

Е. Н. Громова

**МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОЦЕССОВ
И УСТАНОВОК**

Практикум

**Санкт-Петербург
2026**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
**«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»**
Высшая школа технологии и энергетики

Е. Н. Громова

**МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОЦЕССОВ
И УСТАНОВОК**

Практикум

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД

Санкт-Петербург
2026

УДК 662.7(07)

ББК 31.39я7

Г 874

Рецензент

кандидат технических наук, заведующий кафедрой теплосиловых установок и тепловых двигателей Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна
В. Г. Злобин

Громова, Е. Н.

Г 874 Моделирование высокотемпературных процессов и установок: практикум / Е. Н. Громова. — СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2026. — 44 с.

Практикум соответствует программам и учебным планам дисциплины «Моделирование высокотемпературных процессов и установок» для обучающихся по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», профиль «Цифровые энергосистемы и комплексы».

В практикуме рассмотрены основные принципы проектирования и моделирования печных комплексов. Даны методики расчетов печных процессов и прочностных расчетов конструктивных элементов печей.

Для самостоятельной работы обучающихся в конце каждого раздела приведены задачи, которые целесообразно решить для закрепления материала, изученного в рамках аудиторных занятий.

Практикум предназначен для бакалавров очной и заочной форм обучения.

УДК 662.7(07)

ББК 31.39я7

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2026

© Громова Е. Н., 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ ПЕЧИ	6
Задачи к Разделу 1	12
2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ ТОПОЧНОЙ КАМЕРЫ ПЕЧИ	15
Задачи к Разделу 2	16
3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУТЕРОВКИ ПЕЧЕЙ	18
3.1. Моделирование элементов футеровки	19
3.2. Выбор материалов для футеровки печей	20
3.3. Расчет прочности футеровки.....	24
Задачи к Разделу 3	30
4.МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЖУХОВ И КАРКАСОВ ПЕЧЕЙ	32
Задачи к Разделу 4	36
5.МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНДАМЕНТОВ ПЕЧЕЙ	38
Задачи к Разделу 5	40
КЕЙСОВЫЕ ЗАДАНИЯ	41
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	45

ВВЕДЕНИЕ

Моделирование печей представляет собой творческий процесс графического воплощения замыслов проекта печной системы в разрабатываемые конкретные конструкции печей, отвечающие требованиям изготовления и эксплуатации с получением заданного целевого продукта. Это достигается за счет придания различным материальным комплексам конкретных геометрических форм и свойств, определяющих логическую основу конструкции и обеспечивающих возможность создания необходимых оптимальных и управляемых условий для осуществления печных процессов.

Конкретный процесс моделирования печей представляет собой совокупность конструирования их из нестандартных элементов и подбора стандартных элементов с моделированием узлов, стыковки элементов между собой, а также примыкающих к ним коммуникаций, оборудования и различных устройств средств обеспечения.

Моделирование – это процесс целесообразной компоновки всех элементов печей в их взаимной связи и с точным определением мест их расположения.

Свойства, определяющие конструкцию печи:

- 1) обеспечение высокой степени надежности ее функционирования;
- 2) придание материальному комплексу технически обоснованной и целесообразной геометрической формы, необходимой для ее функционирования и удобной для изготовления;
- 3) возможность быстрой, рациональной, частичной или полной ликвидации конструкции для капитального ремонта, реконструкции или модернизации;
- 4) внешняя и внутренняя структуры конструкции. Внешняя структура конструкции печи представляет собой характеристику материального комплекса, которая включает в себя геометрически конструктивный вид и представляет собой качественную характеристику конструкции, а также комплекс размеров, представляющих собой способ определения количественной характеристики конструкции, которая может быть установлена с помощью инструментов.

Для определенного конструктивного типа печи лишь один комплекс размеров оптимален, т. е. соответствует критериям, выбранным в качестве основы для оценки ее конструкции, поэтому недопустим случайный выбор комплекса размеров конструкции печи. Существует тесная связь между комплексом размеров и конструктивным типом печи, изменение комплекса размеров и изменение конструкции печи происходит одновременно. Не всякий комплекс размеров имеет конструктивное значение. Конструктивно значимым считается комплекс размеров, относящийся преимущественно к общим размерам печи.

Внутренняя структура конструкции печи, рассматриваемая как некоторое ее свойство, представляет собой химический состав, физические и химические свойства материального комплекса, из которого она будет выполнена. Физика,

химия, кристаллография, материаловедение – все эти науки используются в качестве научной основы для описания внутренней структуры.

Моделирование печей включает в себя выполнение графического материала на основе конструктивных и прочностных расчетов. Чертежи конструкции печи служат непосредственной технической документацией для изготовления, так как они воплощают строго однозначную основу с конкретизацией до степени, необходимой для дальнейшей деятельности изготовления, и определяют возможность реализации ее функций в рамках единой печной системы «материал–среда–футеровка».

Технически совершенной конструкцией печи следует считать ту, где сочетаются рациональные геометрические пропорции рабочей камеры футеровки печи и расположение устройств теплогенерации, обеспечивающее наилучшее протекание теплотехнологических, термодинамических и механических процессов с исходными материалами в печной среде.

Моделирование печей включает в себя:

- 1) моделирование футеровки печи;
- 2) моделирование кожуха и каркаса печи;
- 3) моделирование устройства для загрузки печи исходными материалами;
- 4) моделирование устройства для выгрузки из печи готовых продуктов;
- 5) моделирование узла ввода в печь и вывода из нее печной среды;
- 6) моделирование узла стыкования сжигательных устройств с остальными элементами печи;
- 7) моделирование устройств и оборудования для преобразования электрической энергии в тепловую (нагреватели, концентраторы, электроды и механизмы их перемещения, короткие сети, трансформаторы и т. д.) для электрических печей;
- 8) моделирование узла стыкования электротермического оборудования с остальными элементами печи;
- 9) моделирование системы охлаждения исходных материалов, полученных продуктов, кожуха печи, упоров, шиберов, заслонок и рабочих окон, дюзов (для выпуска металла, шлака), коротких сетей, трансформаторов и т. д.;
- 10) моделирование рекуператоров и регенераторов;
- 11) моделирование механизмов вращения подины, ванны, барабана, передвижения балок, тележек, лент, колосников, роликов, выкатных подин, разгрузателей заготовок, подъема крышек колодцев, заслонок, вскрывания шлаковых леток, подъема и перепуска электродов и т. д.;
- 12) определение мест и моделирование узлов для установки приборов КИП и автоматического регулирования всех процессов, протекающих в печи и в печной среде;
- 13) моделирование фундаментов под печь и ее механизмов.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ ПЕЧИ

Геометрия рабочей камеры печи представляет собой пространственные формы и характеризуется продольным и поперечным сечениями. Продольное сечение получило название «профиль рабочей камеры» и является наиболее характерным и определяющим для большинства типов печей. При выборе и определении геометрии рабочей камеры необходимо учитывать пропорции, т. е. отношения высоты к ширине (диаметру) и длине печи. Оптимальными считаются такие пропорции, когда сочетаются техническая целесообразность форм с эстетическим видом.

Геометрическая форма рабочей камеры большинства печей является совокупностью ряда простейших фигур (прямоугольный параллелепипед, цилиндр, усеченный конус, полусфера, арка и т. д.), сгруппированных с учетом поставленной цели.

На геометрию рабочей камеры печи существенное влияние оказывает место расположения теплогенератора. С учетом совместимости целевых реакций и реакций окисления топлива возможны два случая: при совместимости реакции – совмещенный вариант рабочей и топочной камер, а при несовместимости – разделенный вариант рабочей камеры от топочной.

В совмещенном варианте учитываются дополнительные объемы, которые занимает факел. При раздельном варианте дополнительно разрабатывается камера для сжигания топлива и газоходы для транспортирования теплоносителя к поверхностям реактора с целью передачи теплоты исходным материалам.

Рабочая камера представляет собой муфель, тигель и т. д., имеющий свои особенности моделирования. Для рабочей камеры электротермических печей должен учитываться в совмещенном варианте объем электродов, защитных мантелей, длина дуги, объем нагревателей и т. д.

Общие требования к рабочей камере печей:

- 1) вместить исходные материалы, обеспечивающие заданную производительность по целевому продукту (разовый для печей с прерывными технологическими процессами и определенными порциями при непрерывных теплотехнологических процессах), печную среду и устройства теплогенерации;
- 2) обеспечить возможность создания заданного температурного профиля исходных материалов во времени и по длине печи;
- 3) обеспечить возможность создания необходимых параметров печной среды.

Геометрия рабочего объема методических печей. Профиль рабочего объема методических печей имеет сложную конфигурацию, что вызвано необходимостью создания различных температурных зон по длине печи с двухсторонним торцевым нагревом. На рисунке 1 (1) представлен профиль рабочего объема толкательной методической печи.

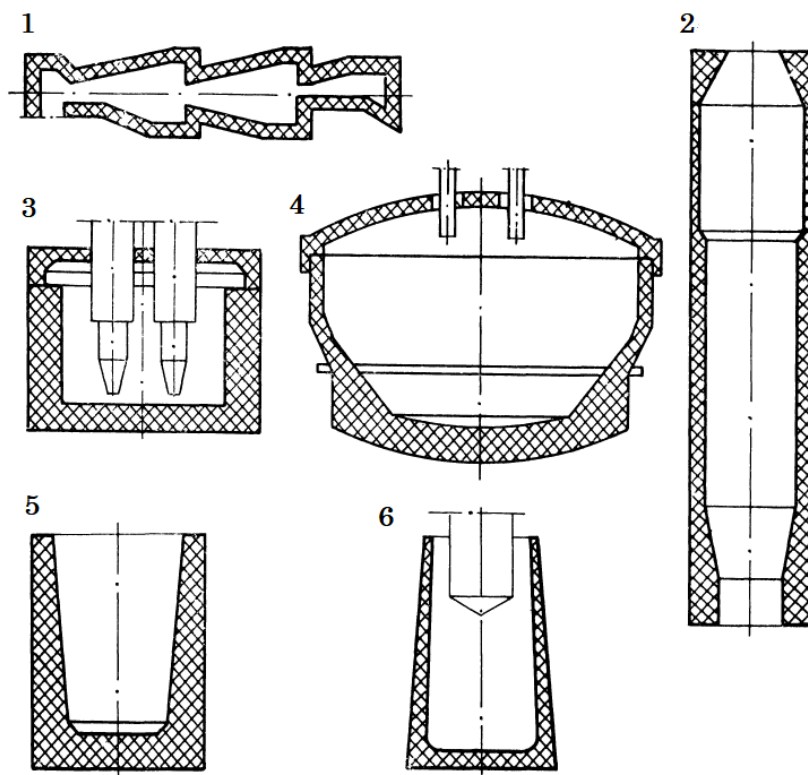


Рисунок 1. Геометрия рабочей камеры различных типов печей:
 1 – методические; 2 – шахтные; 3 – руднотермические ванны;
 4 – сталеплавильные; 5 – тигельные; 6 – шлаковые

Ширину печи определяют, принимая зазоры между рядами заготовок от конца их до боковых стен печи равными 200–300 мм.

В начале печи у торца загрузки рабочий объем расширяют так, чтобы пропустить продукты сгорания топлива в зазор между концами заготовок и стенами печи со скоростью 2–2,5 м/с.

Длину печи, на которой происходит нагрев металла, называют длиной активного пода L_a и определяют ее, исходя из заданной производительности печи G и напряжения активного пода печи N (принимается в зависимости от толщины нагреваемого металла равным 500–650 кг/(м²·ч)).

Сначала определяют площадь поверхности активного пода печи:

$$F = \frac{G}{N}, \text{ м}^2.$$

Затем определяют длину активного пода L_a :

$$L_a = \frac{F}{l}, \text{ м},$$

где l – длина одной или двух заготовок при двухрядном нагреве, м.

Угол наклона пода в печах с нижним обогревом принимается максимально 6°, а в печах без нижнего обогрева – 7° 30'.

Геометрия реакционного объема шахтных печей. Профиль шахтных печей может иметь цилиндрическую, коническую, прямоугольную форму или

быть совокупностью ряда геометрических фигур. Для определения геометрии задается часовая производительность G , Y – насыпная масса, время каждого теплотехнологического процесса $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots \tau_n$, и суммарное время процесса $\tau_{\text{общ}}$. Задаются формой поперечного сечения шахты и определяют ее площадь F . Далее рассчитывают скорость движения исходного материала в печи:

$$\varpi = \frac{G}{(Y \cdot F)}, \text{ м/с.}$$

Высота шахты определяется из формулы:

$$H_{\text{ш}} = \varpi \cdot \tau_{\text{общ}}, \text{ м.}$$

Высота каждой технологической зоны определяется умножением скорости движения исходных материалов на время конкретного вида теплотехнологического процесса.

Полученную расчетом высоту шахты печи необходимо увеличивать на величину, учитывающую конусный вид заполнения шахты исходными материалами под механизмом загрузки.

Геометрия ванны руднотермических электрических печей. Фосфорные печи, как и большинство ферросплавных и карбидных печей, обычно имеют круглую ванну с электродами круглого сечения, расположенными по вершинам равностороннего треугольника. Ванны карбидных печей, кроме того, могут быть прямоугольными; электроды в этом случае также имеют прямоугольное сечение и расположены в ряд. В качестве модуля для определения геометрии ванны этих печей принят диаметр электрода $D_{\text{эл}}$:

$$D_{\text{эл}} = \sqrt{\frac{4 \cdot I_{\text{эл}}}{\pi \cdot j_{\text{эл}}}}, \text{ см,}$$

где $I_{\text{эл}}$ – ток электрода, А;

$j_{\text{эл}}$ – допустимая плотность тока в электроде, А/см².

Для самоспекающихся электродов фосфорных печей $j_{\text{эл}} = 4,2$, а для карбидных – 6–7 А/см².

Диаметр ванны печи: $D_{\text{в}} = 6 \cdot D_{\text{эл}}$. Высота ванны печи находится по формуле:

$$H_{\text{в}} = \frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{в}}}, \text{ м,}$$

где $P_{\text{с}}$ – удельная поверхностная мощность печной установки, кВт/м²;

$P_{\text{в}}$ – удельная объемная мощность печи, кВт/м³.

Геометрия реакционного объема дуговых сталеплавильных печей представляет собой сочетание объемов ванны, плавильного и подсводового пространства.

Ванна печи имеет сфероконическую или параболическую форму. Угол между образующей и осью конуса составляет 45°. Объем начинается с нижней отметки сферической части ванны и заканчивается верхним уровнем откосов.

Плавильный объем имеет цилиндрическую (ровную или ступенчатую) или цилиндроконическую форму, начинается с верхнего уровня откосов ванны и заканчивается уровнем сводовых пят.

Подсводовый объем имеет форму шарового сегмента, начинается с уровня сводовых пят и заканчивается верхней отметкой шарового сегмента.

Исходной величиной при определении размеров реакционного объема печи является A – отношение диаметра зеркала жидкого металла в ванне D_m к ее высоте H_m , т. е. $A = D_m/H_m$. Высота жидкого металла в ванне H_m определяется по формуле:

$$H_m = h_1 + h_2, \text{ м},$$

где h_1 – высота конической части ванны, м;

h_2 – высота сферической части ванны.

Для печей с основной футеровкой рекомендуется принимать $A = 4,5\text{--}5,5$, причем нижний предел относится к печам меньшей вместимости, а для печей с кислой футеровкой и небольшой вместимостью $A = 3,5\text{--}4,5$.

Диаметр зеркала жидкого металла D_m можно определить по формуле:

$$D_m = 2000 \cdot C \sqrt[3]{V_m}, \text{ м},$$

где C – коэффициент, равный $0,875 \cdot A$;

V_m – объем жидкого металла, м^3 .

При расчете объема ванны, занимаемого жидким металлом и шлаком, принимают следующие значения плотности: для стали $6,9\text{--}7,2 \text{ т/м}^3$ (предельный объем $0,138\text{--}0,145 \text{ м}^3/\text{т}$), для кислого шлака $2,9 \text{ т/м}^3$ ($0,345 \text{ м}^3/\text{т}$), для основного шлака $3,2 \text{ т/м}^3$ ($0,312 \text{ м}^3/\text{т}$). В расчетах можно принимать, что шлак занимает $10\text{--}15 \%$ объема жидкого металла.

Диаметр сферической части ванны: $d = D_m - 2 \cdot h_1$.

Полная высота ванны H_b :

$$H_b = H_m + h_{\text{ш}} + h_3 + h_4, \text{ м},$$

где $h_{\text{ш}}$ – высота шлака, мм;

h_3 – высота от зеркала шлака до уровня порога рабочего окна (принимается равной $20\text{--}40 \text{ мм}$);

h_4 – высота от уровня порога рабочего окна до верхнего уровня откосов (принимается равной $30\text{--}40 \text{ мм}$).

Высота шлака $h_{\text{ш}}$ может быть определена по формуле:

$$h_{\text{ш}} = \frac{1000 \cdot V_{\text{ш}}}{0,785 \cdot D_m^2}, \text{ м},$$

где $V_{\text{ш}}$ – объем шлака, м^3 .

Определение размеров плавильного объема зависит от отношения диаметра распада электродов D_p к диаметру плавильного пространства на уровне откосов $D_{\text{пл}}$, которое рекомендуется принимать равным $A_1 = D_p / D_{\text{пл}} \leq 0,35$.

Высоту боковой стены плавильного пространства $h_{\text{ст}}$ рекомендуется принимать для печей с основной футеровкой, равной $h_{\text{ст}} = (0,40 - 0,55) \cdot D_{\text{пл}}$, а для печей с кислой футеровкой $h_{\text{ст}} = (0,45 - 0,60) \cdot D_{\text{пл}}$.

Угол наклона внутренней части боковой стены к вертикали рекомендуется принимать равным $\alpha_1 = 27^\circ$ и $\alpha_2 = 20^\circ$.

Объем подсводового пространства определяется, исходя из высоты шарового сегмента $h_{\text{стр}}$ и принимается равным $h_{\text{стр}} = (0,10 - 0,15) \cdot D_{\text{пр}}$, где $D_{\text{пр}}$ – диаметр основания шарового сегмента (принимается на 1000 мм больше $D_{\text{пл}}$), мм.

Геометрия тигля индукционных печей. Форма тиглей у большинства печей – усеченный конус (см. рис. 1) – характеризуется соотношением A_T :

$$A_T = \frac{D_M}{h_M} = 0,5 - 1,0,$$

где D_M – средний диаметр расплавленного металла в тигле, м;

h_M – высота металла в тигле, м.

Средний диаметр расплавленного металла в тигле определяется по формуле:

$$D_M = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot A_T \cdot V_T}{\pi}},$$

где V_T – полезный объем тигля, м³.

Высота металла в тигле:

$$h_M = \sqrt{\frac{4 \cdot V_T}{(\pi \cdot A_T^2)}}.$$

Геометрия ванны печи электрошлакового переплава. Форма ванны печи электрошлакового переплава характеризуется соотношением:

$$A_{\text{ш}} = \frac{D_{\text{э}}}{D_{\text{к}}} = 0,4 - 0,6,$$

где $D_{\text{э}}$ – диаметр расходуемого электрода, м;

$D_{\text{к}}$ – диаметр кристаллизатора, м.

Для крупных печей $A_{\text{ш}} = 0,6 - 0,8$.

Глубина шлаковой ванны $h_{\text{ш}}$ определяется по формуле:

$$h_{\text{ш}} = 0,064 \cdot \frac{m_{\text{с}}}{\rho_{\text{ш}} \cdot D_{\text{к}}^2},$$

где $m_{\text{с}}$ – масса слитка, кг;

$\rho_{\text{ш}}$ – плотность шлака при 1700–1750 °С, кг/м³.

Определение размеров рабочего пространства камерной печи. Заготовки размещаются на поду продольно. Укладываются они обычно на подставках высотой 0,4–0,5 м. Подставки располагаются поперек пода на

расстоянии друг от друга около 1 м. Если в наличии более трех заготовок, их часто укладывают в два ряда по высоте. Расстояние между боковыми поверхностями заготовки принимается 0,1–0,2 м. Расстояние между стенами печи и поверхностью заготовок составляет примерно 0,5 м. Свод печи – арочного типа. Расстояние между верхней частью свода (замком свода) и верхней поверхностью заготовок рекомендуется принимать для печей с радиационным видом теплообмена 1,0–1,5 м (рис. 2). После определения размеров рабочего пространства печи на схеме показывается план расположения заготовок на поду печи с указанием их размеров.

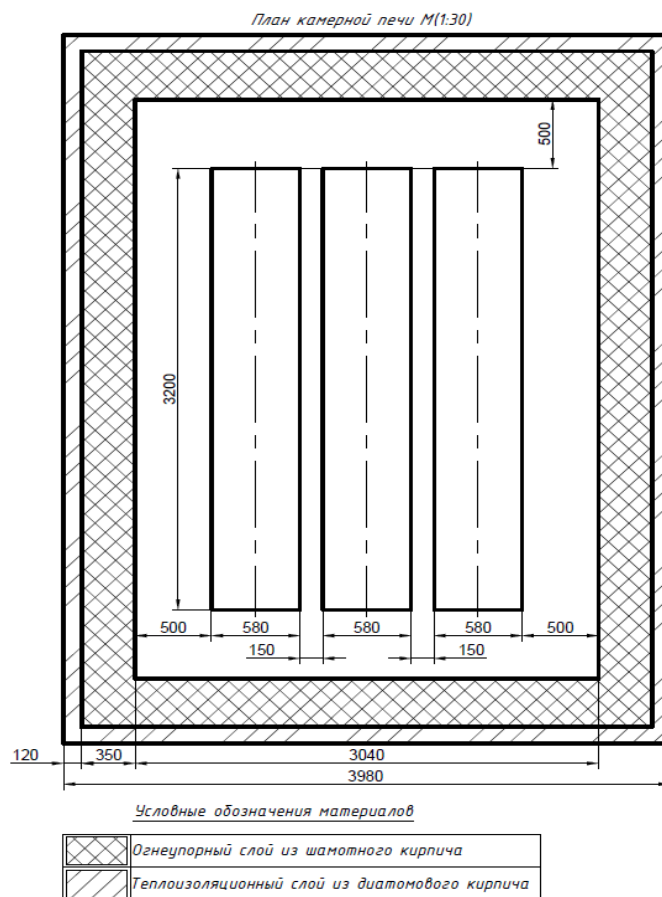


Рисунок 2. Определение геометрических размеров тигля тигельной индукционной печи

Если полезная емкость тигля G_T (вес садки) не задана, то ее определяют из суточной производительности $N_{\text{сут}}$ или из производительности за смену $N_{\text{см}}$ по числу плавов в сутки $n_{\text{сут}}$ или в смену $n_{\text{см}}$:

$$n_{\text{сут}} = \frac{24}{\tau_1 + \tau_2};$$

$$n_{\text{см}} = \frac{\tau_{\text{см}}}{\tau_1 + \tau_2},$$

где τ_1 – длительность плавки, ч;

τ_2 – длительность разливки и загрузки, ч.

Вес садки определяется по выражению:

$$G_m = \frac{N_{\text{сут}}}{n_{\text{сут}}}$$

или

$$G_m = \frac{N_{\text{см}}}{n_{\text{см}}}.$$

По весу садки определяется полезный объем тигля:

$$V_T = \frac{G_m \cdot 10^3}{\gamma_m}, \text{ м}^3,$$

где γ_m – удельный вес расплавленного металла, для расплавленной стали $\gamma_m = 7,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Принимая, что форму тигля можно представить в виде цилиндра диаметром d_0 и высотой h :

$$d_0 = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot A \cdot V_T}{\pi}}, \text{ мм},$$

где $A = d_0/h$, для большинства печей независимо от вида выплавляемого металла или сплава, емкости и типа печи $A = 0,8$.

Для современных печей толщину стенки тигля определяют по эмпирическому выражению:

$$\Delta m = 6 + G_m,$$

где G_m – емкость тигля, т.

ЗАДАЧИ К РАЗДЕЛУ 1

Задача 1

Исходные данные

Заданная производительность печи $G = 15 \text{ т/ч}$.

Напряжение активного пода $N = 580 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{ч)}$.

Длина одной заготовки $l = 4 \text{ м}$.

Нагрев двухрядный.

Требуется найти

1. Площадь поверхности активного пода печи.
2. Длину активного пода.

Задача 2

Исходные данные

Часовая производительность печи $G = 8 \text{ т/ч}$.

Насыпная масса материала $\gamma = 1,8 \text{ т/м}^3$.

Суммарное время процесса в шахте $\tau_{\text{общ}} = 4,5 \text{ ч}$.

Площадь поперечного сечения шахты $F = 2,5 \text{ м}^2$.

Требуется найти

1. Скорость движения материала в печи, ω .
2. Теоретическую высоту шахты печи, $H_{\text{ш}}$.

Задача 3

Исходные данные

Ток электрода $I_{\text{эл}} = 65000 \text{ А}$.

Допустимая плотность тока в самоспекающемся электроде для фосфорной печи $j_{\text{эл}} = 4,2 \text{ А/см}^2$.

Удельная поверхностная мощность печи $P_S = 250 \text{ кВт/м}^2$.

Удельная объемная мощность печи $P_V = 120 \text{ кВт/м}^3$.

Требуется найти

1. Диаметр электрода, $D_{\text{эл}}$.
2. Диаметр ванны печи, $D_{\text{в}}$.
3. Высоту ванны печи, $H_{\text{в}}$.

Задача 4

Исходные данные

Объем жидкого металла (стали) в ванне $V_{\text{м}} = 50 \text{ м}^3$.

Печь с основной футеровкой. Коэффициент $A = D_{\text{м}} / H_{\text{м}} = 5,0$.

Высота конической части ванны $h_1 = 0,6 \text{ м}$.

Высота сферической части ванны $h_2 = 0,4 \text{ м}$.

Объем шлака составляет 12 % от объема жидкого металла ($V_{\text{ш}} = 0,12 \cdot V_{\text{м}}$).

$h_3 = 30 \text{ мм}$, $h_4 = 35 \text{ мм}$.

Требуется найти

1. Диаметр зеркала жидкого металла, $D_{\text{м}}$.
2. Полную высоту ванны, $H_{\text{в}}$.

Задача 5

Исходные данные

Полезный объем тигля (объем металла) $V_{\text{т}} = 0,8 \text{ м}^3$.

Соотношение для тигля $A_{\text{т}} = D_{\text{м}} / h_{\text{м}} = 0,75$.

Требуется найти

1. Средний диаметр расплавленного металла в тигле, $D_{\text{м}}$.
2. Высоту металла в тигле, $h_{\text{м}}$.

Задача 6

Исходные данные

Диаметр расходуемого электрода $D_{\text{э}} = 0,3 \text{ м}$.

Соотношение $A_{\text{ш}} = D_{\text{э}} / D_{\text{к}} = 0,55$.

Масса слитка $m_{\text{с}} = 5000 \text{ кг}$.

Плотность шлака при рабочей температуре $\rho_{\text{ш}} = 2800 \text{ кг/м}^3$.

Требуется найти

1. Диаметр кристаллизатора, $D_{\text{к}}$.

2. Глубину шлаковой ванны, $h_{ш}$.

Задача 7

Исходные данные

Суточная производительность печи $N_{сут} = 72$ т/сут.

Длительность плавки $\tau_1 = 2,5$ ч.

Длительность разливки и загрузки $\tau_2 = 0,5$ ч.

Удельный вес расплавленной стали $\gamma_m = 7,2 \cdot 10^3$ кг/м³.

Требуется найти

1. Число плавов в сутки, n , сут.
2. Вес садки (емкость тигля), G , м.
3. Полезный объем тигля, V , м³.

Задача 8

Исходные данные

Полезный объем тигля из предыдущей задачи.

Соотношение для тигля $A = d_o / h = 0,8$.

Требуется найти

1. Диаметр тигля (цилиндрической модели), d_o .
2. Толщину стенки тигля для емкости $G_t = 25$ т.

Задача 9

Исходные данные

На поду камерной печи необходимо разместить 6 заготовок.

Габариты одной заготовки (Д x Ш x В): 3.0 м x 0.8 м x 0.6 м.

Заготовки укладываются в 2 ряда по высоте на подставках.

Расстояние между боковыми поверхностями заготовок 0,15 м.

Расстояние от стенок печи до заготовок 0,5 м.

Высота от верха заготовок до замка свода (для радиационного теплообмена) 1,2 м.

Высота подставки 0,45 м.

Требуется найти

1. Минимальную ширину рабочей камеры печи.
2. Минимальную высоту рабочей камеры печи (от пода до замка свода).

Задача 10

Исходные данные

Проектируется печь для процесса, где целевая реакция **несовместима** с реакциями окисления топлива.

Требуется найти

1. Какой вариант расположения теплогенератора по отношению к рабочей камере должен быть выбран?
2. Какие дополнительные элементы (узлы) необходимо предусмотреть в конструкции печи в этом случае?

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ ТОПОЧНОЙ КАМЕРЫ ПЕЧИ

Топочные камеры предназначены для сжигания топлива с целью получения теплоносителя заданных параметров (количества, температуры, давления и химической активности).

Топочные камеры бывают отдельно стоящими и встроенными в конструкцию футеровки печи.

Выбор и конструирование отдельно стоящих топочных камер подробно описаны в специальной литературе.

Встроенные топочные камеры являются элементом футеровки печи и в зависимости от рабочей камеры имеют свои геометрические формы. В большинстве конструкций печей топочные камеры располагаются в футеровке с расчетом наилучшей теплопередачи в рабочую камеру. По геометрическим формам они бывают круглыми, прямоугольными. Размеры камеры зависят от вида сжигаемого топлива, формы пламени, типа сжигательного устройства, геометрии муфеля, реторты. Основным требованием к топочным камерам является возможность размещения в ней пламени и обеспечение полного сжигания топлива с $\alpha \geq 1$. Объем камеры сжигания может быть ориентировочно принят из расчета – 1200 кВт/м³ для природного газа и 600 кВт/м³ – для мазутного топлива.

Основные размеры внутреннего пространства печей определяются формой, размерами обрабатываемых изделий и их расположением на поду с учетом промежутков между стенами печи и изделиями, а также заданной производительностью печи и удобством обслуживания.

При размещении изделий без промежутков несколько увеличивается их количество в рабочем пространстве печи, но при этом ощутимо возрастает время нагрева.

Скорость нагрева в камерных печах принимается в следующих пределах: для печей с загрузкой 3–5 т – 150–200 °С/ч; для печей с загрузкой 10–30 т – 100–120 °С/ч; для печей с загрузкой 50 т и выше – 50–75 °С/ч.

Высота и форма свода выбираются в соответствии с размерами факела с тем, чтобы не допустить в рабочем пространстве застойных зон и обеспечить полноту сгорания топлива. При этом следует иметь в виду, что по мере приближения факела к поду теплоотдача увеличивается, а температура свода уменьшается. Также необходимо избегать прямого соприкосновения факела горения с изделиями при непосредственном обогреве. В таких случаях факел направляется тангенциально к заготовкам.

Свод печи, как правило, выполняется по радиусу, равному ширине печи. При ширине печи свыше 4 м рекомендуется применение подвесного свода.

Сечение отводящих дымовых каналов определяется скоростью газов, которая принимается равной 2–3 м/с.

Оптимальную высоту от пода до свода (над металлом) можно определить, пользуясь приближенной эмпирической формулой:

$$H = (A + 0,05 \cdot B) \cdot t_r \cdot 10^{-3},$$

где A – коэффициент, зависящий от температуры газов в данной зоне печи; для $t_r=900$ °С и ниже $A=0,5$ – $0,55$, для $t_r=1500$ °С и выше $A=0,65$;

B – ширина печи (для камерных печей наибольший размер), м;

t_r – температура газов в той зоне печи, для которой определяется высота, °С.

Для электрических камерных печей с температурой нагрева 700–900 °С и мощностью от 3 до 300 кВт удовлетворяющие результаты дает формула, связывающая мощность печи с полезным объемом ее рабочей камеры:

$$N = 100 \cdot V^{0,67}.$$

Для вертикальных электрических печей можно использовать следующую приближенную формулу:

$$N = 50 \cdot d \cdot H,$$

где H – высота печи, м;

d – диаметр печи, м.

Таким образом, высоту печи выбирают на основании практических данных по аналогии с хорошо работающими установками, принимая во внимание характер садки, размещение горелок и направление движения газов в рабочем пространстве печи. При наличии искусственно создаваемой интенсивной циркуляции продуктов сгорания в печи форма и высота свода выбираются по необходимым скоростям и направлению газовых потоков.

ЗАДАЧИ К РАЗДЕЛУ 2

Задача 1

Исходные данные

Тип топлива: природный газ.

Тепловая мощность горелочного устройства (количество теплоты, выделяемое при сжигании топлива в единицу времени) $Q = 3600$ кВт.

Рекомендуемая объемная плотность тепловыделения для природного газа составляет 1200 кВт/м³.

Требуется найти

1. Минимально необходимый объем топочной камеры для обеспечения полного сгорания топлива, $V_{\text{топ}}$.

Задача 2

Исходные данные

Камерная печь для нагрева металла.

Температура газов в рабочей зоне печи $t_r = 1300$ °С.

Ширина печи $B = 3,2$ м.

Для заданного диапазона температур коэффициент A можно принять равным 0,6.

Требуется найти

1. Оптимальную высоту от пода до свода (над металлом) в рабочей зоне, H , по приближенной эмпирической формуле.

Задача 3

Исходные данные

Электрическая камерная печь сопротивления с температурой нагрева 850 °С.

Полезный объем рабочей камеры печи $V = 0,5$ м³.

Требуется найти

1. Ориентировочную электрическую мощность печи, N , необходимую для обеспечения заданного температурного режима.

Задача 4

Исходные данные

Вертикальная электрическая печь цилиндрической формы.

Диаметр рабочей камеры $d = 0,8$ м.

Высота рабочей камеры $H = 1,5$ м.

Требуется найти

1. Ориентировочную электрическую мощность печи, N , по приближенной формуле для вертикальных печей.

Задача 5

Исходные данные

Проектируется камерная печь для термообработки стальных изделий с **непосредственным обогревом** открытым пламенем (факелом). Температура в рабочей зоне высокая. Изделия имеют сложную форму и чувствительны к локальным перегревам.

Требуется найти

1. Какую рекомендацию по отношению факела к заготовкам необходимо выполнить при конструировании?

2. Какие два основных требования предъявляются к форме и высоте свода печи в данном случае?

Задача 6

Исходные данные

Проектируется печь для высокотемпературного процесса ($t > 1400$ °C) с использованием газовых горелок. Требуется обеспечить равномерный нагрев рабочей камеры и минимизировать тепловые потери через футеровку.

Требуется найти

1. Какой тип топочной камеры (отдельно стоящая или встроенная в футеровку) предпочтителен в данном случае и почему?

2. Какие два основных критерия определяют геометрическую форму и расположение встроенной топочной камеры в печи?

Задача 7

Исходные данные

В существующей камерной печи с шириной 5,2 м обнаружены застойные зоны в верхней части рабочего пространства, а также локальный перегрев свода в районе расположения горелок.

Требуется найти

1. Какое конструктивное решение (форму свода) рекомендуется применить для печи такой ширины и почему?

2. Как следует организовать движение факела и продуктов сгорания в печи для устранения застойных зон и перегрева свода?

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУТЕРОВКИ ПЕЧЕЙ

Футеровка является важным конструктивным элементом печи. Моделирование футеровки – это творческий процесс создания из огнеупорных, кислотоупорных, теплоизоляционных и облицовочных изделий и материалов ограждения рабочих и топочных камер, а также всех узлов стыкования с другими конструктивными элементами печи, средствами обеспечения печного процесса и системой автоматизации. Это достигается за счет придания футеровочным изделиям и материалам теоретически обоснованных, реальных и конкретных пространственных внутрипечных и внешних геометрических форм с необходимой степенью детализации.

Общие правила моделирования футеровки печей:

1) окончательные геометрические формы печей определяются при совместном рассмотрении желаемой геометрии рабочей и топочной камер, рекомендуемых в проекте, с другими конструктивными элементами (газоходы, отверстия для установки сжигательных устройств, смотровых, загрузочных и разгрузочных окон, люков для очистки подины и т. д.), а также узлов стыкования с другими элементами печи, средств обеспечения и систем управления печными процессами;

2) недопустимость на внутренней поверхности рабочей и топочной камер футеровки теоретически необоснованных выступов и впадин, так как они влияют на характер движения печной среды, что отражается на процессах смесеобразования, сжигания горючих исходных материалов и топлива, теплообмена, на стойкость футеровки и т. д.;

3) равная прочность элементов футеровки;

4) наличие температурных швов для предотвращения разрушения футеровки при разогреве;

5) недопустимость укладки футеровочных изделий в перевязку при различных значениях линейного расширения при нагревании.

Основным документом, по которому производят выполнение футеровки печи, служат рабочие чертежи. В них приводятся общий вид футеровки, поперечные и продольные разрезы со всеми необходимыми размерами.

На чертежах футеровки печи указывается, с чего начинается футеровка, во сколько рядов и при каком положении кирпича она укладывается, какие огнеупорные, теплоизоляционные и облицовочные материалы используются для нее. Указывается также толщина конструктивных элементов футеровки. Если имеются проемы, то в чертеже положение проема дано по длине и высоте стены, а также приведены его размеры. Таким образом отражаются все необходимые указания, которые позволяют в точности обеспечить заданные геометрические формы с соблюдением заданных размеров и применять те материалы, которые приняты в рабочих чертежах печи.

3.1. Моделирование элементов футеровки

Большинство печей имеет некоторые общие конструктивные элементы, например, подину и выстилку, стены, арки, своды и т. д. Рассмотрим эти общие конструктивные элементы.

Подины и выстилки. Конструктивный элемент, ограничивающий рабочее пространство снизу, называется подиной. На подину воздействует высокая температура, масса материала и шлака. Подины обычно футеруют из высоко-, огне- и кислотоупорных материалов. Нижняя часть футеровки любой печи и борова, которая выстилается кирпичом, называется выстилкой. Выстилку футеруют независимо от условий работы печи менее огнеупорным материалом большим швом. Подины и выстилки бывают одно- (однослойными) или многорядными (многослойными).

Стены. Конструктивный элемент, ограждающий рабочее пространство печи, топки, борова и каналов с боков, называется стенами. Стены бывают прямыми, закругленными и кольцевыми, горизонтальными, вертикальными и наклонными. Их футеруют различными по толщине огне- и кислотоупорными материалами, а наружные – теплоизоляционными. Рекомендуемые толщины футеровки стен приведены в таблице 1.

Арки предназначены для перекрытия проемов в стенах. Они могут быть плоскими, полуциркульными и лучковыми. Арки, направленные выпуклостью вниз, называются обратными.

Свод. Рабочее пространство печи между двумя стенами перекрывается сверху сводом. Своды могут быть плоскими, полуциркульными и лучковыми (распорными).

Разновидностью свода является *купол*, перекрывающий сверху печь цилиндрической формы. Купола бывают полуциркульными и лучковыми.

Таблица 1. Рекомендуемые толщины футеровки стен

Высота стены, м	Температура в камере сгорания, °С	Рабочий огнеупорный слой		Наружный огнеупорный слой	
		материал	толщина, мм	материал	толщина, мм
≤1	1200	Шамот класса «Б»	113	Диатомит	230
≤1	1500	Шамот класса «Б»	230	Диатомит	113 – 230
>1	1200	Шамот класса «Б»	230	Пеношамот	230
>1	1500	Шамот класса «А»	230 – 348	Пеношамот	230

Расстояние между стенами, на которые опирается свод, называется *пролетом*. При пролетах более 1 м плоские своды, набираемые из кирпича, подвешивают, и они называются подвесными. В настоящее время своды до 3 м выполняют из жаростойкого бетона, не требующими подвески. Своды бывают одно- и многослойными. Каждый слой называется окатом.

От величины пролета свода зависит и его толщина. При пролете 1–1,5 м толщина свода – в полкирпича; при пролете 1,5–2,5 м – в один кирпич. При пролете 3,0–5,0 м применяют кирпичи длиной 250–300 мм либо выкладывают свод в несколько скатов без перевязки между собой.

Рекомендуемые толщины прочного свода приведены в таблице 2.

Пяты. Кирпичи или фасонные камни, которые воспринимают нагрузку арки или свода и передают их на стены, называются пятами.

Рабочие окна. Проемы в стенах печей, через которые загружают и выгружают материалы и изделия, называются рабочими окнами. Кроме рабочих окон, в стенах печей устраиваются отверстия для установки горелки или форсунки, а также лазы, гляделки для подсветки реакционной камеры и установки приборов КИП и автоматики. На своде печи устраиваются отверстия для электродов и загрузочных течек, отвода газов из печи.

Рекуператоры. Установки, предназначенные для использования тепла отходящих газов от реакционной камеры передачей его через стену воздуха, поступающего в горелку, форсунку или другие теплоиспользующие установки, называются рекуператорами.

Дымовые каналы и воздухопроводы. Каналы, по которым транспортируются отходящие газы от печи или нагретый воздух от рекуператоров, могут быть как внутри печи, так и вне ее. Подземный канал для транспортирования отходящих газов – боров, надземный канал – дымопровод и наружный воздухопровод подлежат футеровке. Дымо- и воздухопроводы работают под давлением и поэтому для создания газоплотности заключаются в металлический кожух.

При проектировании футеровки печей рассматриваются следующие вопросы:

- определение геометрии рабочей и топочной камер печи;
- выбор материалов композиции футеровки и толщины огнеупорного, кислотоупорного и теплоизоляционных слоев с учетом химической, термической и механической стойкости.

3.2. Выбор материалов для футеровки печей

В основу выбора материалов для футеровки рабочей и топочной камер положена их химическая, термическая и механическая стойкость.

В таблице 2 приведены данные о стойкости огнеупорных материалов к химическим воздействиям. Этими данными можно пользоваться при выборе материалов в химических печах; для нагревательных печей определяющей является огнеупорность.

Физико-химические свойства некоторых наиболее часто применяемых футеровочных материалов приведены в таблице 3.

Таблица 2. Стойкость огнеупорных материалов с односторонней нагрузкой по отношению к химическим воздействиям при температуре 1000 °С

Среда	Плавный кварц (SiO ₂)	Динас	Силикат циркония	Алюмосиликаты (>20 % Al ₂ O ₃)	Шамот (>30 % Al ₂ O ₃)	Кирпич (>50 % Al ₂ O ₃)	Корунд (>95 % Al ₂ O ₃)	Магнезит	Хромомагнезит	Доломит	Углерод
	Максимальная температура использования материала, °С										
	1200	1600	1550	1300	1350	1450	1700	1650	1550	1600	2000
Кислород (O ₂)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Двуокись серы (SO ₂)	+	+	1	1	1	1	1	1	+	1	1
Водород (H ₂)	+	+	1	1	1	1	1	+	-	1	+
Сероводород (H ₂ S)	1	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-
Синильная кислота (HCN)	1	-	0	-	-	-	-	-	-	-	1
Плавиковая кислота (HF)	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	+
Оксид углерода (CO)	+	1	1	0	0	0	1	+	0	0	+
Хлор (Cl ₂)	+	1	+	-	-	-	-	-	-	0	0
Азотная кислота (HNO ₃)	+	1	-	1	-	-	1	-	-	-	-
Фосфорная кислота (H ₃ PO ₄)	+	1	-	1	-	-	1	-	-	-	-
Серная кислота (H ₂ SO ₄)	+	1	-	1	1	1	1	-	-	-	+
Соляная кислота (HCl)	+	1	-	1	0	0	+	-	-	-	+
Сульфат железа (FeSO ₄)	-	-	-	0	-	0	0	1	1	-	-
Сульфат натрия (Na ₂ SO ₄)	+	1	0	0	1	1	+	1	0	0	-
Хлорид натрия (NaCl)	0	-	0	1	-	-	1	+	-	-	1
Карбонат натрия (Na ₂ CO ₃)	-	-	-	-	-	0	1	+	-	-	-

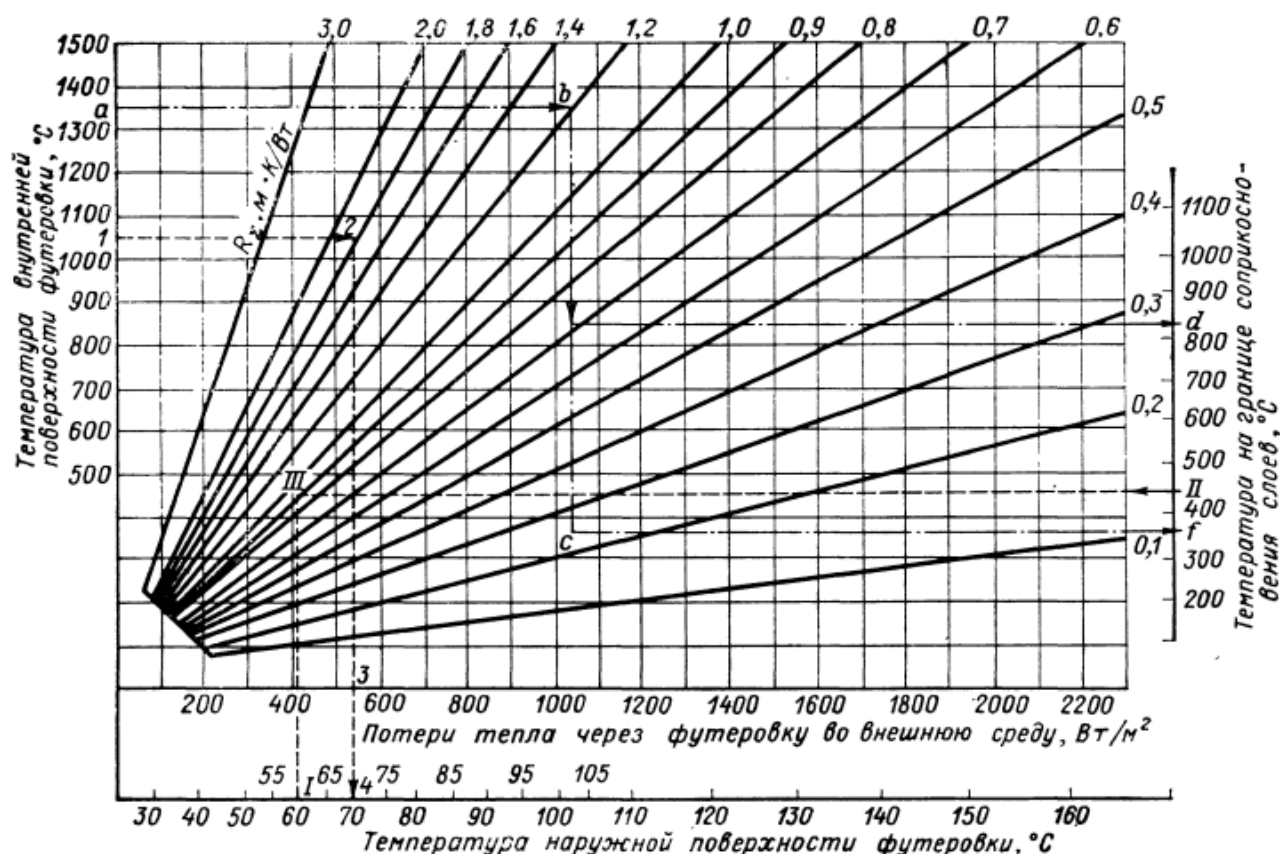
Условные обозначения: + – стойкий; 1 – ограниченно стойкий; 0 – умеренно стойкий; - – не стойкий.

Таблица 3. Основные свойства огнеупорных материалов

Наименование (класс, сорт, марка)	Объемный вес, кг/дм ³	Огнеупорность, °C	Мак температура, °C	Удельное эл. сопротивление при 800°C, Ом·см	Удельная теплоемкость, ккал/((кг·°C) ($a=10^{-3}t$)	Предел прочности при сжатии, кг/см ²	Темп. начала деформации под нагрузкой, °C
Шамотный кирпич	1,8–1,9	1580–1730	1200–1400	7–15	$0,21 + 0,55a$	100–125	1150
Динасовый кирпич	1,9–1,95	1690–1710	1600–1650	200 9 при 1200 °C	$0,2 + 0,06a$	175–200	1620– 650
Талькомагнезит	2,9	1540–1560	–	–	0,3 при 200 °C	300–400	1500
Изделия из плавленного мулита	2,1–2,4	1800–1850	1750	–	$0,22 + 0,6a$	1500–3000	1700
Силикатные изделия (мулитовые)	2,2–2,4	1780–1850	1650	180 11 при 1200 °C	$0,2 + 0,06a$	400–800	1500–1650
Корундовые (алундовые) изделия	2,3–2,6	1800–2000	1600–1700	1000 100 при 1200 °C	$0,19 + 0,1a$	200–800	1550–1680
Карборундовые изделия (карбофракс)	2,3–2,6	2000–2200	1400–1500	800 40 при 1200 °C	$0,23 + 0,35a$	400–900	1500–1650
Графитовые изделия	1,6	2000	2000	–	0,2	200–300	1900
Красный кирпич	1,6	–	700–750	–	$0,21 + 0,055a$	50–150	–

Общая толщина футеровки рабочей камеры печей складывается из толщины огне- или кислотоупорного и теплоизоляционных слоев, составляющих композицию футеровки. Она также зависит от температуры внутренней и наружных поверхностей рабочей или топочной камер, температуры на границе между слоями, толщины применяемых стандартных, фасонных огнеупорных и теплоизоляционных изделий.

Температуру на внутренней стене рабочей и топочной камер принимают равной температуре печной среды, материалов в печи или теплоносителя. Температуру окружающей среды для расчетов принимают равной 20 °С.



23

Для определения толщины любой футеровки необходимо знать потери теплоты через футеровку при известной температуре окружающей среды и принимаемой температуре наружной поверхности футеровки печи. Сначала по рисунку 3 определяют общее термическое сопротивление R_{Σ} всей футеровки. Далее находят термическое сопротивление теплоизоляционного слоя $R_{т.и.}$, задавшись его толщиной. Зная $R_{т.и.}$, рассчитывают термическое сопротивление огнеупорного слоя $R_{о.м.}$:

$$R_{о.м.} = R_{\Sigma} - R_{т.и.}, \text{ мм.}$$

При принятых огнеупорном материале и множителе p толщина огнеупорного слоя вычисляется по уравнению:

$$\delta = \frac{R_{о.м.}}{p}, \text{ мм.}$$

Значения коэффициентов теплопроводности некоторых огнеупорных материалов приведены в таблице 4.

Таблица 4. Коэффициенты теплопроводности огнеупорных материалов

Материалы	Плотность, кг/м ³	Мах температура применения, °С	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
Динасовый кирпич	1900–2100	1700	$0,9 + 0,0007 \cdot t$
Шамотный кирпич	1900–2150	1350–1450	$0,84 + 0,0006 \cdot t$
Диатомовый кирпич	500–700	850	$0,113 + 0,000123 \cdot t$
Асбест пушенный	900	700	$0,13 + 0,00019 \cdot t$
Совелитовые плиты	350–400	450–500	$0,079 + 0,00019 \cdot t$

Полученные величины толщины огнеупорного слоя, в случае использования штучных изделий, приводятся в соответствие со стандартными размерами. Этим же методом можно определить толщину любого слоя из теплоизоляционного материала, если задаваться толщиной огнеупорного материала и других теплоизоляционных материалов, входящих в композицию футеровки.

3.3. Расчет прочности футеровки

Расчет прочности футеровки проводят по несущей способности (прочности и устойчивости), а также по образованию или раскрытию швов для конструкций, в которых по условиям эксплуатации образование трещин и раскрытие швов не допускается или их раскрытие должно быть ограничено.

Расчет по несущей способности проводят на воздействие только расчетных нагрузок, а расчет по образованию трещин или раскрытию швов – на воздействие расчетных или нормативных нагрузок.

Расчет прочности футеровки по несущей способности осуществляют для температуры 50 °С. Нормативными характеристиками футеровки, определяющими ее прочность, являются марка кирпича и марка раствора. Под

наименованием марки имеется в виду временное сопротивление сжатию, выраженное в Па.

Расчет футеровки элементов печи и топки при центральном сжатии проводится по формуле:

$$N_{\text{пр}} \leq \varphi \cdot R \cdot F ,$$

где R – расчетное сопротивление футеровки сжатию (табл. 5);

F – площадь сечения элементов футеровки;

φ – коэффициент продольного изгиба, учитывающий снижение несущей способности сжатых элементов постоянного по длине сечения при продольном изгибе и зависящий от гибкости элемента $\lambda_{\text{пр}}^r$ (для прямоугольного сплошного сечения от $\lambda_{\text{пр}}^h$) и упругой характеристики футеровки (табл. 6);

r – меньший радиус инерции сечения элементов;

h – меньший размер прямоугольного сечения;

$N_{\text{пр}}$ – приведенная продольная сила,

$$N_{\text{пр}} = \left(\frac{N_{\text{дл}}}{m_{\text{дл}}} \right) + N_{\text{кр}};$$

$N_{\text{дл}}$ – расчетная продольная сила от длительно действующей части нагрузки;

$N_{\text{кр}}$ – расчетная продольная сила от кратковременно действующей части нагрузки;

$m_{\text{дл}}$ – коэффициент (табл. 7), учитывающий влияние длительного действия нагрузки на несущую способность элементов толщиной менее 30 см или с радиусом инерции сечения менее 8,7 см (для элементов толщиной 30 см и более или с радиусом сечения 8,7 см и более коэффициент $m_{\text{дл}}$ принимается равным единице).

Таблица 5. Расчетные сопротивления R сжатию кладки из кирпича

Марка кирпича	Расчетные сопротивления R , МПа									
	при марке раствора								при прочности раствора	
	200	150	100	75	50	25	10	4	0,2 МПа	0 МПа
300	3,9	3,6	3,3	3,0	2,8	2,5	2,2	1,8	1,7	1,5
250	3,6	3,3	3,0	2,8	2,5	2,2	1,9	1,6	1,5	1,3
200	3,2	3,0	2,7	2,5	2,2	1,8	1,6	1,4	1,3	1,0
150	2,6	2,4	2,2	2,0	1,8	1,5	1,3	1,2	1,1	0,8
125	–	2,2	2,0	1,9	1,7	1,4	1,2	1,1	0,9	0,7
100	–	2,0	1,8	1,7	1,5	1,3	1,0	0,9	0,8	0,6
75	–	–	1,5	1,4	1,3	1,1	0,9	0,7	0,6	0,5
50	–	–	–	1,1	1,0	0,9	0,7	0,6	0,5	0,35
35	–	–	–	0,9	0,8	0,7	0,6	0,45	0,4	0,25

Таблица 6. Коэффициент продольного изгиба

$\lambda_{пр}^h$	$\lambda_{пр}^r$	φ	$\lambda_{пр}^h$	$\lambda_{пр}^r$	φ
4	14,0	1,00	14	49,0	0,79
5	17,5	0,98	15	52,5	0,77
6	21,0	0,96	16	56,0	0,74
7	24,5	0,94	17	68,0	0,70
8	28,0	0,92	20	70,0	0,65
9	31,5	0,90	22	76,0	0,61
10	35,0	0,88	24	83,0	0,56
11	38,5	0,86	26	90,0	0,52
12	42,0	0,84	28	97,0	0,49
13	45,5	0,81	30	104,0	0,45

Для футеровки из кирпича на тяжелых растворах должны применяться значения упругой характеристики, представленные в таблице 7.

Таблица 7. Упругая характеристика

Упругая характеристика a	1000	750	500
Марка раствора	200 – 25	10	4

Таблица 8. Коэффициент $m_{дл}$

λ^h	λ^r	$m_{дл}$	λ^h	λ^r	$m_{дл}$
8	28	1,00	26	90	0,63
10	35	0,96	28	97	0,59
12	42	0,92	30	104	0,55
14	49	0,88	32	111	0,51
16	56	0,84	34	118	0,47
18	63	0,80	36	125	0,43
20	70	0,75	38	132	0,39
22	76	0,71	40	139	0,34
24	83	0,67	42	146	0,29

Гибкость элемента рассчитывается по формулам:

$$\lambda_{пр}^h = \lambda^h \sqrt{\frac{1000}{a}} = \frac{l}{h} \cdot \sqrt{\frac{1000}{a}} ;$$

$$\lambda_{пр}^r = \lambda^r \sqrt{\frac{1000}{a}} = \frac{l}{r} \cdot \sqrt{\frac{1000}{a}} ,$$

где $l = 1,5$;

H – расчетная высота элемента конструкции;

H – расстояние между горизонтальными опорами.

Расчет внецентренно сжатых элементов футеровки проводят по формуле:

$$N \leq m_{\text{дл}} \cdot \varphi_1 \cdot R \cdot F_c \cdot \omega.$$

Для прямоугольного сечения:

$$N \leq m_{\text{дл}} \cdot \varphi_1 \cdot R \cdot F_c \cdot \left[1 - \left(\frac{2 \cdot e}{h} \right) \right] \omega;$$

$$\varphi_1 = \varphi \cdot \left\{ \left(1 - \left(\frac{e}{h} \right) \right) \cdot \left[0,006 \cdot \left(\frac{l}{h_3} \right) - 0,2 \right] \right\}.$$

Здесь N – сжимающая сила;

F_c – площадь сжатой части сечения, которую определяют в предположении прямоугольной эпюры напряжения сжатия (центр тяжести сжатой части сечения совпадает с точкой приложения внешней сжимающей силы N и положения границы площади; определяется из условия равенства нулю статического момента этой площади относительно ее центра тяжести);

ω – коэффициент, равный для сечения произвольной формы

$$\omega = 1 + \left(\frac{e}{3 \cdot y} \right) \leq 1,25$$

и для прямоугольных сечений

$$\omega = 1 + \left(\frac{e}{1,5 \cdot h} \right) \leq 1,25;$$

y – расстояние от центра тяжести сечения до края сечения в сторону эксцентриситета;

h – высота сечения (в направлении действия изгибающего момента);

e – эксцентриситет продольной силы относительно центра тяжести сечения ($h_3 = 3,5 \cdot r$, где r – радиус инерции сечения в направлении действия изгибающего момента, для прямоугольного сечения $h_3 = h$).

Расчет элементов футеровки на прочность при осевом растяжении проводят по формуле:

$$N \leq R_p \cdot F,$$

где N – растягивающая сила;

R_p – расчетное сопротивление футеровки растяжению по перевязанному сечению, значение которого при растворе марки 50–100 следует принимать равным 0,16 МПа.

Расчет элементов футеровки на срез осуществляют по формуле:

$$Q \leq \left(R_{\text{ср}} + \frac{0,8}{\sigma_0} \right) \cdot F.$$

Здесь Q – расчетная поперечная сила;

$R_{\text{ср}}$ – расчетное сопротивление футеровки срезу, значение которого по непереязанному сечению при растворе марки 50 и выше следует принимать равным 0,16 МПа;

σ_0 – среднее напряжение сжатия при наименьшей расчетной продольной нагрузке, подсчитанное с коэффициентом перегрузки 0,9;

F – расчетная площадь сечения.

Расчет сечений футеровки при местном сжатии (смятии), если нагрузка распределяется на части площади, следует проводить по формуле:

$$N \leq \mu \cdot \alpha \cdot R_{\text{см}} \cdot F_{\text{см}},$$

где N – величина местной нагрузки;

μ – коэффициент полноты эпюры давления от местной нагрузки (при равномерном распределении давления $\mu = 1$; при треугольной эпюре давления $\mu = 0,5$); $\alpha = 1,5-0,5$.

Расчетное сопротивление футеровки $R_{\text{см}}$ при местном сжатии (смятии):

$$R_{\text{см}} = \gamma \cdot R;$$

$$\gamma = \sqrt[3]{\frac{F}{F_{\text{см}}}} \leq \gamma_1,$$

Здесь F – расчетная площадь сечения в зависимости от местной нагрузки;

$F_{\text{см}}$ – площадь смятия или сжатия, на которую передается нагрузка;

γ_1 – коэффициент, зависящий от материала футеровки и места приложения нагрузки (принимается равным 1,5–2,0).

Расчет элементов футеровки на изгиб следует проводить по формуле:

$$M = R_{\text{и}} \cdot W,$$

где M – расчетный изгибающий момент;

$R_{\text{и}}$ – расчетное сопротивление футеровки растяжению при изгибе по перевязанному сечению (табл. 9);

W – момент сопротивления сечения футеровки на упругость.

Проектирование элементов футеровки, работающих на изгиб по неперевязанному сечению, не допускается.

Таблица 9. Расчетные сопротивления футеровки из кирпича правильной формы осевому растяжению R_p , растяжению при изгибе $R_{\text{и}}$ и срезу $R_{\text{ср}}$

Вид напряженного состояния	Расчетное сопротивление (МПа)								
	20,0	15,0	10,0	7,5	5,0	3,5	2,5	1,5	1,0
Осевое растяжение R_p	2,5	2,0	1,8	1,3	1,0	0,8	0,6	0,5	0,3
Растяжение при изгибе $R_{\text{и}}$	4,0	3,0	2,5	2,0	1,6	1,2	1,0	0,7	0,5
Срез $R_{\text{ср}}$	10,0	8,0	6,5	5,5	4,0	3,0	2,0	1,4	0,9

Расчет устойчивости футеровки. Футеровку печей, выполненных из кирпичей, и свободно стоящие стены, имеющие прямоугольную форму и значительную высоту, проверяют на допустимые отношения высоты стен и столбов к их толщинам:

$$\beta = \frac{H}{h},$$

где H – высота футеровки;

h – толщина стены или меньшая сторона прямоугольного сечения столба.

При свободной длине стены l менее $2,5H$ величина h не должна превышать значений, приведенных ниже в таблице 10

Таблица 10. Максимально возможная высота стены

Марка раствора	50 и выше	25	10	4 и ниже
β	25	22	20	–

Для стен и столбов сложного сечения вместо h принимается условная толщина $h' = 3,5 \cdot r$, ($r = \sqrt{1/F}$). Для столбов круглого и многоугольного сечения, вписанного в окружность, $h' = 0,85 \cdot d$ (d – диаметр сечения столба).

При высоте футеровки H больше свободной длины L отношение L/h не должно превышать значений $\beta = H/h$.

Предельные отношения β для стен и перегородок умножают на коэффициент k (табл.11), если условия отличаются от вышеприведенных.

Таблица 11. Значения поправочного коэффициента

Характеристика стен и перегородок	Поправочный коэффициент k
Стены и перегородки, не несущие нагрузки, при толщине $\geq 0,25$ м	1,2
Стены и перегородки, не несущие нагрузки, при толщине $\leq 0,15$ м	1,6
Перегородки с проемами	0,9
При свободной длине стен между примыкающими поперечными стенами $\geq 2,5 \cdot H$	0,9
При свободной длине стен между примыкающими поперечными стенами $\geq 3,5 \cdot H$	0,8

Предельные отношения β для столбов принимаются в соответствии с таблицей 12.

Таблица 12. Допустимые отношения высоты стен и столбов

Толщина столба, м	$\geq 0,9$	0,7 – 0,89	0,5 – 0,69	$< 0,5$
β	0,75	0,70	0,65	0,60

Расчет футеровки печи и отдельно стоящей топки на воздействие высокой температуры и внешней нагрузки. При нагревании футеровки печи с внутренней стороны выше 50°C ее расчет по несущей способности (прочности и устойчивости) можно проводить по тем же формулам, по которым осуществляется расчет ненагретой футеровки, однако с учетом изменения физико-механических характеристик ее кладки (прочности, модуля упругости и т. д.) при нагревании. Изменения этих характеристик в зависимости от температуры устанавливают на основании экспериментальных данных.

ЗАДАЧИ К РАЗДЕЛУ 3

Задача 1

Исходные данные

Для процесса с температурой 1000 °С проектируется рабочая камера печи, в среде которой присутствуют пары серной кислоты (H_2SO_4) и оксид углерода (СО). Из соображений огнеупорности рассматриваются два материала: шамотный кирпич класса «Б» и динасовый кирпич.

Требуется найти (используя таблицу 2)

1. Дать оценку химической стойкости (стойкий/ограниченно стойкий/умеренно стойкий/не стойкий) каждого материала в заданной среде.
2. На основании оценки сделать вывод о пригодности каждого материала для данной печи.

Задача 2

Исходные данные

Стена печи высотой 1,8 м.

Температура в камере сгорания 1550 °С.

Требуется найти (используя таблицу 1)

1. Рекомендуемый материал и толщину рабочего (огнеупорного) слоя футеровки.
2. Рекомендуемый материал и толщину наружного (теплоизоляционного) слоя футеровки.

Задача 3

Исходные данные

Свод печи опирается на стены, расстояние между которыми (пролет) составляет 2,2 м.

Требуется найти

1. Рекомендуемую минимальную толщину кирпичного свода.

Задача 4

Исходные данные

Колонна (столб) футеровки печи.

Сечение: прямоугольное 0,5 м х 0,5 м ($F = 0,25 \text{ м}^2$).

Высота колонны между горизонтальными опорами $H = 3,0 \text{ м}$.

Материал: кладка из кирпича марки 150 на растворе марки 50.

Продольная сила от длительной нагрузки $N_{\text{дл}} = 400 \text{ кН}$.

Продольная сила от кратковременной нагрузки $N_{\text{кр}} = 100 \text{ кН}$.

Упругая характеристика кладки $\alpha = 750$.

Требуется найти

1. Приведенную продольную силу, $N_{\text{пр}}$.
2. Расчетную высоту элемента l и гибкость, $\lambda_{\text{пр}}^h$.
3. Коэффициенты φ (продольного изгиба) и $m_{\text{дл}}$.
4. Расчетное сопротивление кладки сжатию, R (из таблицы 5).

5. Проверить условие прочности: $N_{пр} \leq \phi \cdot R \cdot F$. Сделать вывод о прочности колонны.

Задача 5

Исходные данные

Свободно стоящая стена печи (не несущая нагрузку от свода).

Высота стены $H = 4,5$ м.

Толщина стены $h = 0,38$ м.

Длина стены (между поперечными стенами) $L = 12$ м.

Кладка выполнена на растворе марки 25.

Требуется найти

1. Отношение $\beta = H / h$.
2. Сравнить полученное β с предельно допустимым значением для данной марки раствора.
3. Учесть поправочный коэффициент k , если свободная длина стены $L \geq 2,5 \cdot H$.
4. Сделать вывод об устойчивости стены.

Задача 6

Исходные данные

Для заданных условий общее требуемое термическое сопротивление футеровки составило $1,2$ ($\text{м}^2 \cdot \text{К}$)/Вт. Композиция футеровки: огнеупорный слой (шамотный кирпич, множитель $p = 1,2$) и теплоизоляционный слой (совелитовая плита).

Термическое сопротивление теплоизоляционного слоя, заданное предварительно, $R_{т.и} = 0,8$ ($\text{м}^2 \cdot \text{К}$)/Вт.

Требуется найти

1. Термическое сопротивление огнеупорного слоя, $R_{о.м.}$.
2. Толщину огнеупорного слоя, δ .

Задача 7

Исходные данные

Элемент свода печи работает на осевое растяжение. Растягивающее усилие $N = 25$ кН. Кладка выполнена из кирпича марки 100 на растворе марки 75. Площадь растягиваемого сечения (по перевязанным швам) $F = 0,1$ м^2 .

Требуется найти (используя таблицу 8):

1. Расчетное сопротивление кладки осевому растяжению, R_p .
2. Проверить условие прочности: $N \leq R_p \cdot F$. Сделать вывод.

Задача 8

Исходные данные

На футеровку печи опирается металлическая балка. Местная нагрузка от балки $N = 80$ кН распределена равномерно ($\mu = 1$) на площадь смятия $F_{см} = 0,05$ м^2 . Полная площадь расчетного сечения футеровки в зоне опоры $F = 0,2$ м^2 . Кладка из кирпича марки 200 на растворе марки 100. Коэффициент γ_1 для условий задачи принять равным 1,8.

Требуется найти

1. Расчетное сопротивление кладки сжатию, R (из таблицы 5, для центрального сжатия).
2. Коэффициент $\gamma = \sqrt[3]{\frac{F}{F_{\text{см}}}}$ и сравнить его с γ_1 .
3. Расчетное сопротивление при местном смятии $R_{\text{см}} = \gamma \cdot R$.
4. Проверить условие прочности при местном смятии: $N \leq \mu \cdot \alpha \cdot R_{\text{см}} \cdot F_{\text{см}}$ (α принять равным 1,0). Сделать вывод.

Задача 9

Исходные данные

При разработке чертежей футеровки новой методической печи конструктор, стремясь улучшить аэродинамику потока газов в зоне загрузки, предложил выполнить на внутренней поверхности стены плавный выступ-направляющую.

Требуется найти

1. Какое из общих правил моделирования может быть нарушено данным предложением?
2. Дать обоснование, почему это недопустимо.

Задача 10

Исходные данные

Необходимо перекрыть рабочее пространство печи шириной 4,5 м.

Требуется найти

1. Какой тип свода (плоский, полуциркульный, подвесной, из бетона) является наиболее рациональным для данного пролета?
2. Дать краткое обоснование выбора.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЖУХОВ И КАРКАСОВ ПЕЧЕЙ

Для создания надежной герметичности, необходимой жесткости и прочности печь заключается в металлический кожух, а прямоугольные конструкции – дополнительно в металлический каркас.

Кожух. Если назначением кожуха является только герметизация печи, то его достаточно выполнить сварным из тонкого стального листового материала, но если кожухом воспринимаются силовые нагрузки от футеровки и получаемого теплоносителя, то его необходимо выполнять как несущую конструкцию. Даже самые высокие давления газов, которые могут быть в печи, не должны деформировать кожух.

Расчет температурных напряжений в системе кожух–футеровка. При определении температурных напряжений в кожухе и футеровке печи, работающей при высоких и повышенных температурах, можно пользоваться следующим методом.

Определение температурных напряжений растяжения в кожухе проводится по формуле:

$$\sigma_n = m \cdot E_n \cdot (\alpha_\phi \cdot \Delta t_\phi - \alpha_n) \cdot (1 - \xi),$$

где σ_n – напряжение в кожухе;

m – коэффициент перегрева, равный 1,1;

α_ϕ – коэффициент температурного расширения футеровки, соответствующий температуре ее внутренней поверхности;

Δt_ϕ – приращение температуры внутренней поверхности футеровки относительно ее первоначального состояния;

α_n – коэффициент температурного расширения кожуха;

ξ – модуль упругости материала кожуха в нагретом состоянии;

$\xi = x/h$ – средняя относительная высота сжатия зоны футеровки;

x – высота сжатой зоны по толщине футеровки, считая от ее внутренней поверхности;

h – толщина футеровки.

Относительная высота ξ сжатой зоны футеровки вычисляется по формуле:

$$\xi = \sqrt{(0,5 \cdot a) + a} - (0,5 \cdot a).$$

При температуре внутренней поверхности футеровки $< 300^\circ\text{C}$

$$a = 3 \cdot \mu \cdot n,$$

а при $> 300^\circ\text{C}$

$$a = 5 \cdot \mu \cdot n,$$

где $\mu = \delta_k/h$ – коэффициент армирования футеровки кожухом;

δ_k – толщина кожуха;

h – толщина футеровки.

Напряжения сжатия в футеровке, нагретой с внутренней стороны до 300°C включительно, определяются по формуле:

$$\sigma_\phi = \frac{\sigma_n \cdot \xi}{[3 \cdot n \cdot (1 - \xi)]}; n = \frac{E_k}{E_\phi},$$

где σ_ϕ – напряжение в более нагретой (сжатой) зоне футеровки;

n – отношение модуля упругости стали кожуха к модулю упругости футеровки в нагретом состоянии;

E_ϕ – модуль упругости футеровки в нагретом состоянии.

Напряжения сжатия в футеровке, нагретой с внутренней стороны выше 300°C :

$$\sigma_\phi = \frac{\sigma_n \cdot \xi}{[5 \cdot n \cdot (1 - \xi)]}.$$

Температурные напряжения в кожухе печи должны удовлетворять условию $\sigma_n \leq R_n$, где R_n – расчетное сопротивление кожуха печи растяжению в нагретом состоянии.

Температурные напряжения в более нагретой сжатой зоне футеровки должны удовлетворять условию $\sigma_{\phi} \leq R_{\phi}$, где R_{ϕ} – расчетное сопротивление футеровки, сжатой в нагретом состоянии.

Для компенсации температурных деформаций допускается вводить эластичную прослойку между кожухом и футеровкой, когда работу растянутого кожуха с напряжениями не выше значений, определенных предыдущими формулами, невозможно обеспечить повышением его температуры нагревания до 300 °С за счет изоляции кожуха или, когда повышение температуры конструктивно невозможно (например, открытый кожух или каркас). В этом случае при расчете температурных напряжений в кожухе вместо обычного модуля упругости кожуха E_k вводится расчетный (условный) модуль упругости кожуха $E_{ку}$, определяемый по формуле:

$$E_{ку} = \frac{E_n}{1 + \left[\frac{E_k \cdot \delta_k \cdot \delta_n}{(\nu \cdot E_n \cdot r_k^2)} \right]},$$

где δ_k – толщина кожуха;

δ_n – толщина эластичной прослойки;

E_n – модуль упругости материала прослойки в нагретом состоянии;

ν – коэффициент упругости материала прослойки в нагретом состоянии, равный отношению упругих деформаций прослойки при сжатии к ее полным деформациям;

r_k – радиус кожуха.

Определение толщины стенки элементов наружного кожуха цилиндрической печи, работающей под внутренним давлением. Толщина стенки наружного кожуха печей, работающих под значительным внутренним давлением, должна быть определена расчетом на прочность при расчетном давлении и температуре.

Расчетным называется давление, при котором производится расчет на прочность кожуха печи. Расчетное внутреннее давление P_p принимается, как правило, равным рабочему давлению. Под рабочим давлением в кожухе печи следует понимать максимальное избыточное давление без учета допустимого кратковременного повышения давления во время действия предохранительного взрывного клапана. Расчетное давление должно исключать нежелательное постоянное действие предохранительного взрывного клапана.

За расчетную температуру стенки наружного кожуха печи принимается наибольшая температура стенки, определяемая на основе тепловых расчетов или равная температуре среды, соприкасающейся со стенкой. При нагреве открытым пламенем температура наружной стенки принимается как увеличенная на 50 °С температура среды, соприкасающейся со стенкой.

При наличии внутренней футеровки расчетную температуру стенки принимают равной температуре поверхности футеровки, соприкасающейся со стенкой. Допустимые напряжения $\sigma_{доп}$ материала кожуха печи определяют по формуле:

$$\sigma_{доп} = \eta \cdot \sigma,$$

где η – поправочный коэффициент, учитывающий взрыво- и пожароопасность топлива (может быть принят равным 0,9);

σ – нормативное допускаемое напряжение, МПа.

Цилиндрический кожух печи. Расчетная толщина стенки цилиндрического кожуха печи, работающего под внутренним давлением, определяется по формуле:

$$\delta_c = \frac{P_p \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_{\text{доп}} - P_p} + C,$$

где P_p – расчетное давление, МПа;

D – внутренний диаметр кожуха печи, м;

φ – коэффициент прочности сварного соединения (может быть принят равным 0,9);

C – прибавка к расчетной толщине стенки кожуха печи на коррозию, равная 2 мм.

Каркас. Металлический каркас предназначен для обвязки футеровки печи с целью создания необходимой прочности, а также для крепления форсунок, горелок, восприятия возникающих усилий в футеровке.

Каркас состоит из вертикальных стоек, пятых балок, поперечных и продольных связей, стягивающих боковые и торцевые стойки, а также других деталей из стального проката для крепления конструктивных элементов печи.

Силы, действующие на каркас печи, делятся на две группы. Одни возникают под действием собственной массы свода и его термического расширения, т. е. распора свода, а другие в результате термического расширения прямых стен.

Точно рассчитать силу распора свода трудно, так как приходится учитывать расширение футеровки под влиянием высокой температуры и необходимо исследование упругой и пластической деформации самого свода и его пят. Для определения сил распора следует принять ряд допущений, простых и в то же время достаточно хорошо соответствующих истинному положению, чтобы они были пригодными для всех практических целей.

Для расчетов следует принять, что кривая давления свода соответствует средней линии свода (т. е. проходит по середине его толщины), что пяты свода неподвижны и что действительные усилия больше, чем рассчитанные с помощью принятых допущений, и их значения зависят от температуры в печи и увеличиваются с повышением ее. Для расчетов вводится коэффициент K , учитывающий эту зависимость. Он имеет следующие числовые значения: до 900 °С – 2, до 1100 °С – 2,5, до 1300 °С – 3,0, до 1500 °С – 3,5.

Термическое расширение стены печи должно быть скомпенсировано температурными швами. Задачей каркаса является направление расширения футеровки стены печи в сторону температурных швов. Эти усилия обеспечиваются боковыми и торцевыми стойками и продольными связями, стягивающими их. Максимальное усилие, которому должны противостоять продольные связи (растягивающие при первом разогреве), равно силе трения половины стены относительно ее основания. Даже при низком рабочем

напряжении в связях из-за чрезвычайно малой ее площади сечения соблюдается это правило. Поэтому рекомендуется применять эмпирическое правило: площадь поперечного сечения продольных связей составляет 0,5 % от площади сечения футеровки (боковые стены и свод), которую они стягивают. Верхние связи рекомендуется устанавливать над поперечными. В углах футеровки швы мешают правильному сжатию. При каждом последующем нагреве некоторые кирпичи выступают из стенок в углах или же углы стенок наклоняются наружу. Продольные связи должны противостоять этим сдвигам стенок, поскольку они приводят к обвалу футеровки. Углы футеровки должны быть защищены и ужесточены. Нижние продольные связи или балки следует пропускать только в вентилируемые каналы.

ЗАДАЧИ К РАЗДЕЛУ 4

Задача 1

Исходные данные

Цилиндрическая печь работает под внутренним давлением.

Внутренний диаметр кожуха $D = 2,0$ м.

Рабочее (расчетное) давление $P_p = 0,45$ МПа.

Допускаемое напряжение материала кожуха $\sigma_{\text{доп}} = 120$ МПа.

Коэффициент прочности сварного шва $\varphi = 0,9$.

Прибавка на коррозию $C = 2$ мм.

Требуется найти

1. Расчетную толщину стенки кожуха, δ_c .
2. Толщину стенки с учетом прибавки на коррозию.

Задача 2

Исходные данные

Печь с футеровкой в кожухе.

Толщина футеровки 0,35 м.

Толщина кожуха $\delta_k = 0,012$ м.

Температура внутренней поверхности футеровки $> 300^\circ\text{C}$. Приращение температуры $\Delta t_\phi = 800^\circ\text{C}$.

Коэффициент температурного расширения футеровки, $\alpha_\phi = 6,0 \cdot 10^{-6}$ ($1/^\circ\text{C}$).

Коэффициент температурного расширения кожуха (стали), $\alpha_n = 12,0 \cdot 10^{-6}$ ($1/^\circ\text{C}$).

Отношение модулей упругости: $n = E_k / E_\phi = 15$.

Коэффициент перегрева $m = 1,1$.

Модуль упругости кожуха $E_n = 2,0 \cdot 10^5$ МПа.

Требуется найти

1. Коэффициент армирования $\mu = \delta_k / h$.
2. Параметр a (для $t_\phi > 300^\circ\text{C}$) и относительную высоту сжатой зоны футеровки ξ .
3. Напряжение растяжения в кожухе, σ_n .
4. Напряжение сжатия в нагретой зоне футеровки, σ_ϕ .

Задача 3

Исходные данные

Каркас печи воспринимает распор арочного свода.

Пролет свода (ширина печи) $L = 4,0$ м.

Толщина свода $h_{св} = 0,23$ м.

Удельный вес материала свода (футеровки) $\gamma_{\phi} = 18000$ Н/м³.

Температура в рабочей камере печи $t = 1250$ °С.

Коэффициент K , учитывающий увеличение усилий с температурой: для 1300 °С $K=3,0$.

Требуется найти (на основе допущений, что кривая давления проходит по середине толщины свода, пяты неподвижны, усилие направлено горизонтально):

1. Вес 1 погонного метра свода.
2. Ориентировочное горизонтальное усилие распора H на одну пята свода, используя упрощенный подход:

$$H \approx \frac{q \cdot L}{2 \cdot f},$$

где q – вес погонного метра свода;

f – стрела подъема свода (принимается для полуциркульного свода $f \approx L/2$).

Учтите коэффициент K .

Задача 4

Исходные данные

Необходимо подобрать сечение продольных связей, стягивающих боковые стены и свод печи.

Общая площадь сечения футеровки (боковые стены + свод) в поперечном разрезе, которую необходимо стягивать, составляет $F_{фут} = 12,5$ м².

Материал связей – сталь с расчетным сопротивлением растяжению $R_y = 240$ МПа.

Требуется найти (по эмпирическому правилу):

1. Требуемую площадь поперечного сечения всех продольных связей ($F_{св}$), как 0,5 % от $F_{фут}$.
2. Если использовать 4 связи (по две сверху и снизу), то требуемую площадь сечения одной связи.

Задача 5

Исходные данные

Проектируется новая печь. Рассматриваются два варианта кожуха:

1. Тонкий сварной кожух из листовой стали.
2. Толстый несущий кожух, рассчитанный на восприятие нагрузки.

Требуется найти

1. Основное назначение кожуха в первом варианте.
2. Основное назначение кожуха во втором варианте.
3. При каком условии работы печи необходимо применить второй вариант кожуха?

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНДАМЕНТОВ ПЕЧЕЙ

Фундамент является конструктивным элементом печи, предназначенным для равномерного распределения на грунт неодинаковых суммарных нагрузок от массы остальных элементов, находящихся в печи исходных материалов и полученных продуктов, печной среды и средств обеспечения печного процесса.

В зависимости от вида и характера течения теплотехнологического процесса во времени фундамент подвергается постоянно изменяющимся механическим и термическим воздействиям, которым он должен противостоять, сохранив строительную прочность и целостность, иначе произойдет неравномерная его усадка, что приведет к возникновению трещин в футеровке с последующим разрушением ее в течение короткого времени.

Механическими воздействиями на фундамент являются вибрации от механизмов, удары кузнечного молота, динамические нагрузки, возникающие при загрузке печи, врезании корпуса, перемещении шихты и т. д.

В связи с тем, что фундамент соприкасается с основанием подины печи, она подвергается нагреву. Это ведет к термическому расширению фундамента и возникновению усилий, обуславливающих образование трещин по краям фундамента вследствие расширения его средней части. Возникающая опасность может быть сведена до минимума, если толщина фундамента в середине меньше, чем по краям. Рекомендуются также заменять грунт под средней частью фундамента на утрамбованный шлак.

Максимально допустимая температура фундамента в центре печи должна составлять примерно 480 °С, исходя из следующего уравнения:

$$T_{\text{ц}} = T_0 + (T_{\text{вн}} - T_0)e^{-1,92 \cdot Z/D} \approx 480 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

где T_0 – начальная температура фундамента;

$T_{\text{вн}}$ – температура внутренней поверхности рабочей камеры футеровки;

Z – толщина пода;

D – ширина пода между стенами.

На фундаменте, в который заложены нижние концы каркасных стоек, у печей со сплошным и неветилируемым основанием подин необходимо усиление внешнего края фундамента арматурой из расчета: на каждый квадратный метр пода требуется арматура общей площадью 8,7 см² для печей, работающих при температурах 1200 °С, и 5,8 см² для печей с температурой 980 °С. Для печей, площадь пода которых от 40 м² и более, основание пода должно быть вентилируемым.

Необходимую площадь фундамента определяют, исходя из геометрических размеров основания футеровки печи с каркасом и защитного слоя. Полученная величина площади фундамента подлежит последующему уточнению по удельным допустимым напряжениям на грунт конкретного места сооружения печи.

Верхние контуры фундамента повторяют формы основания футеровки печи с учетом дымоходов; они имеют дополнительные каналы для обслуживания вагонеточного пространства, рельсовых путей и механизмов и т. д.

Толщина фундамента определяется изгибающими моментами, образующимися благодаря одновременному и противоположно направленному действию грунта и фундамента с расположенными на нем нагрузками.

К особенностям моделирования фундаментов печи необходимо отнести следующее:

1) на один и тот же фундаментный массив нельзя опирать печи и другие сооружения (в этом случае может произойти различная осадка фундамента и могут появиться трещины и перекосы в сооружениях);

2) если конструкции печи располагаются ниже уровня грунтовых и ключевых вод, то фундамент строят так, чтобы исключался доступ воды к футеровке путем:

а) устройства вокруг фундаментов глиняных стенок до 300 мм толщиной;

б) гидроизоляцией фундамента;

в) искусственного снижения горизонта грунтовых вод, устройством дренажа с таким расчетом, чтобы уровень воды был на 0,5 м ниже подошвы фундамента;

г) сооружения сварного кессона из мягкой стали (при отсутствии агрессивных вод);

3) основание фундамента должно быть расположено ниже глубины промерзания грунта (обычно 1,8 м от уровня земли); в отапливаемых или горячих цехах, где нет промерзания грунта, углубление фундамента незначительно;

4) для предотвращения сильного нагревания фундамента от футеровки устраиваются воздушные каналы для вентиляции;

5) в случае заделки стоек каркаса в фундамент последний должен быть проверен на достаточную прочность от скалывающих усилий.

Если фундамент заложен на меньшую, чем требуется, глубину, он может опуститься, выпирая прилегающие слои грунта. Глубину заложения фундамента, при которой исключена возможность выпирания грунта, можно рассчитать по формуле:

$$h = H \cdot tg^4 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - b \cdot \frac{1 - tg^4 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)}{2 \cdot tg \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)},$$

где φ – угол естественного откоса, град;

b – ширина фундамента, м;

$H = \frac{P}{(F \cdot \gamma)}$ – высота столба грунта, м;

P – давление фундамента, Па;

F – площадь фундамента, м²;

γ – объемная масса грунта, кг/м³.

Кроме того, для визуального наблюдения за работой горелочных устройств, процессом горения топлива и состоянием внутренней поверхности футеровки камеры горения на фронтальной или боковой стене печи предусматриваются смотровые окна. Кроме того, все печи должны быть оборудованы штуцерами для установки приборов КИП и автоматики.

ЗАДАЧИ К РАЗДЕЛУ 5

Задача 1

Исходные данные

Печь установлена на бетонный фундамент.

Температура внутренней поверхности рабочей камеры $T_{\text{вн}} = 1100^\circ\text{C}$.

Начальная температура фундамента $T_0 = 20^\circ\text{C}$.

Толщина пода печи (футеровки между камерой и фундаментом) $Z = 0,5$ м.

Ширина пода между стенами $D = 3,0$ м.

Требуется найти

1. Температуру в центре фундамента под печью, $T_{\text{ц}}$, по приведенной формуле.
2. Сравнить полученное значение с максимально допустимой температурой ($\sim 480^\circ\text{C}$) и сделать вывод о необходимости дополнительных мер теплоизоляции или вентиляции.

Задача 2

Исходные данные

Печь с неветилируемым основанием подины устанавливается на фундамент, в который заделаны стойки каркаса.

Рабочая температура в печи 1250°C .

Площадь пода печи $S_{\text{под}} = 25$ м².

Требуется найти

1. Какому значению температуры (1200°C или 980°C) ближе условия задачи?
2. Необходимую общую площадь поперечного сечения арматуры для усиления внешнего края фундамента.
3. Если использовать арматурные стержни диаметром 20 мм (площадь одного стержня ≈ 3.14 см²), определить требуемое количество стержней.

Задача 3

Исходные данные

Проектируется фундамент для печи в неотапливаемом помещении.

Давление фундамента на грунт $P = 150$ кПа.

Площадь подошвы фундамента $F = 15$ м².

Объемная масса грунта $\gamma = 1800$ кг/м³.

Угол естественного откоса грунта $\phi = 30^\circ$.

Ширина фундамента $b = 3,5$ м.

Глубина промерзания грунта в регионе 1,6 м.

Требуется найти

1. Высоту эквивалентного столба грунта, H .
2. Минимальную глубину заложения фундамента h из условия невыпирания грунта.
3. Сравнить полученную глубину с глубиной промерзания и указать, какое требование будет определяющим для окончательной глубины заложения.

Задача 4

Исходные данные

Печь планируется установить на участке с высоким уровнем грунтовых вод (УГВ), который находится выше планируемой подошвы фундамента. Грунтовые воды неагрессивны.

Требуется найти

Перечислить и кратко пояснить **три** возможных инженерных решения (метода) из перечисленных в тексте, которые позволят защитить фундамент и футеровку печи от грунтовых вод.

Задача 5

Исходные данные

Проектируется тяжелая печь с мощным металлическим каркасом, стойки которого планируется жестко заделывать в фундамент.

Требуется найти

1. Какую дополнительную проверку (расчет) необходимо выполнить для фундамента в данном случае?
2. Какая основная опасность термического характера грозит фундаменту такой печи и какая общая рекомендация дается для минимизации этой опасности (два пункта)?

КЕЙСОВЫЕ ЗАДАНИЯ

Кейс 1: Проектирование камерной методической печи для нагрева стальных заготовок

Исходные данные

Назначение: нагрев стальных слитков перед ковкой.

Производительность: $G = 20$ т/ч.

Заготовки: размеры 0,4 х 0,4 х 3,0 м (Ш х В х Д). Укладываются в два ряда по ширине и один ряд по высоте.

Топливо: природный газ. Тепловая мощность горелок в зоне нагрева $Q = 6000$ кВт.

Температурный режим: максимальная температура печной среды $t_r = 1350$ °С.

Конструктивные требования:

- Ширина печи определяется заготовками с зазорами: между рядами 0,25 м, от заготовок до стен 0,3 м.
- Высоту от верха заготовок до свода (для радиационного теплообмена) принять 1,3 м.
- Подина на подставках высотой 0,45 м.
- Свод полуциркульный.
- Футеровка стен: внутренний слой – шамот класса «А» (для $t > 1500$ °С), наружный – пеношамот.
- Кожух стальной, воспринимающий нагрузки. Расчетное давление в рабочей камере $P_p = 0,005$ МПа.

- Фундамент бетонный. Уровень грунтовых вод низкий. Глубина промерзания 1,5 м. Давление на грунт не должно превышать 200 кПа.

Задание:

1. Определить основные геометрические размеры рабочей камеры (ширину, высоту, длину активного пода, если напряжение пода $N = 600 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$).
2. Рассчитать минимальный объем топочного пространства (камеры сгорания), исходя из мощности горелок.
3. Определить толщину слоев футеровки боковой стены (используя таблицу 1 из раздела 3, для высоты стены $>1 \text{ м}$ и $t=1500 \text{ }^\circ\text{C}$).
4. Обосновать тип кожуха (легкий/несущий) и рассчитать (ориентировочно) толщину стенки плоского кожуха для заданного давления (пренебрегая сложным расчетом, оценить порядок).
5. Сформулировать два ключевых требования к фундаменту данной печи, исходя из наличия каркаса и высоких температур.

Кейс 2: Проектирование шахтной печи для обжига известняка

Исходные данные

Назначение: обжиг кускового известняка.

Производительность: $G = 15 \text{ т/ч}$.

Материал: насыпная масса известняка $\gamma = 1,6 \text{ т/м}^3$. Суммарное время процесса в шахте $\tau_{\text{общ}} = 6 \text{ часов}$.

Сечение шахты: круглое. Задаться диаметром $D_{\text{ш}} = 2,2 \text{ м}$.

Топливо: природный газ. Горелки расположены в средней зоне. Необходимо обеспечить полное сгорание в объеме факела.

Температура в зоне обжига: $t_r = 1150 \text{ }^\circ\text{C}$.

Конструкция:

- Футеровка шахты: рабочая зона – шамотный кирпич класса «Б», зона загрузки/выгрузки – шамотный кирпич класса «Б» + наружная теплоизоляция.
- Печь имеет внешний несущий стальной кожух цилиндрической формы.
- Каркас предусматривает стягивающие связи для противодействия распору футеровки.
- Фундамент массивный, должен компенсировать неравномерный нагрев.

Задание:

1. Рассчитать скорость движения материала и полную высоту шахтной части печи.
2. Обосновать форму и расположение топочных устройств (встроенные в футеровку или отдельные), исходя из характера процесса.
3. По таблице 2 из раздела 3 оценить стойкость шамотной футеровки к атмосфере печи (CO_2 , продукты сгорания). Выбрать тип шамота («А» или «Б») для зоны обжига.
4. Определить, какие усилия (распор, термическое расширение стен) должен воспринимать каркас шахтной печи.

5. Указать, какая основная опасность грозит фундаменту от нагрева снизу и какую форму фундамента (по толщине) рекомендуется принять для ее уменьшения.

Кейс 3: Проектирование руднотермической печи для выплавки ферросплавов

Исходные данные

Назначение: Плавка 75 % ферросилиция.

Мощность: электрическая, через три самообжигающихся электрода. Сила тока на электроде $I_{эл} = 85$ кА. Допустимая плотность тока $j_{эл} = 5,5$ А/см².

Геометрия ванны: круглая. Удельная объемная мощность $P_V = 400$ кВт/м³. Удельная поверхностная мощность $P_S = 280$ кВт/м².

Футеровка ванны: контактирует с расплавленным металлом и шлаком. Материал должен быть стойким к восстановительной атмосфере (СО, SiO-пары) и основным шлакам.

Кожух: цилиндрический, водяного охлаждения, работает при атмосферном давлении, но воспринимает вес футеровки и расплава.

Температура в ванне до 1800 °С. Температура кожуха (охлаждаемого) ~100°С.

Фундамент: должен выдерживать большую массу агрегата и иметь эффективное воздушное охлаждение.

Задание:

1. Рассчитать диаметр электрода ($D_{эл}$), диаметр ванны (D_v) и ее высоту (H_v).
2. Выбрать материал для рабочего слоя футеровки ванны из предложенных в таблице 2: шамот, диас, магнезит, углерод. Дать обоснование химической стойкости.
3. Объяснить, почему в данной печи необходим именно несущий (силовой) кожух, а не легкий.
4. Рассчитать температурное напряжение растяжения в кожухе (σ_n), если: толщина футеровки $h=0,8$ м, толщина кожуха $\delta_k=0,03$ м, $\Delta t_{\phi}=1750$ °С, $\alpha_{\phi}=5,5$ (1/°С), $\alpha_n=12$ (1/°С), $E_n=25$ МПа, $n=20$, $m=1,1$. (Принять $\xi \approx 0,15$).
5. Перечислить не менее трех специальных требований к фундаменту этой печи, связанных с ее огромной массой, высоким тепловым потоком и вибрациями от работы электродов.

Кейс 4: Проектирование камерной печи с выдвижным подом для термообработки

Исходные данные

Назначение: отжиг крупногабаритных сварных конструкций.

Рабочая камера: ширина $B = 4,5$ м, длина $L = 8$ м, высота (заданная) $H = 3$ м.

Нагрев: электрический, радиационными панелями. Требуемая установленная мощность $N = 450$ кВт.

Температура: максимальная рабочая $t_{раб} = 950$ °С.

Конструкция:

- Футеровка: Многослойная (огнеупор + теплоизоляция). Свод подвешной плоский (из-за большого пролета).
- Каркас: Жесткий металлический, воспринимающий вес свода и обеспечивающий жесткость коробки.

- Кожух: Листовой, герметизирующий, приваренный к каркасу.
- Фундамент: Представляет собой ровную площадку с рельсовыми путями для выдвижного пода. Уровень пола цеха совпадает с уровнем пода.

Задание:

1. Рассчитать по эмпирической формуле, достаточна ли заданная высота рабочей камеры H для эффективного радиационного теплообмена при $t_r=950$ °С (Коэффициент A принять 0,55).
2. Определить минимальную толщину плоского подвесного свода при пролете 4,5 м.
3. Рассчитать требуемую площадь поперечного сечения продольных связей каркаса, если площадь сечения футеровки торцевой стены (для которой связи работают на распор) составляет $F_{\text{торц}} = 12$ м².
4. Объяснить, почему для данной печи подходит легкий (герметизирующий) кожух, и как решается проблема его температурного расширения.
5. Описать особенности фундамента для печи с выдвижным подом. Что должно быть предусмотрено в конструкции фундамента, кроме несущей плиты?

Кейс 5: Проектирование агрегата электрошлакового переплава (ЭШП)

Исходные данные

Назначение: переплав расходуемого электрода в водоохлаждаемом кристаллизаторе.

Слиток: масса $m_c = 8000$ кг, диаметр кристаллизатора $D_k = 0,7$ м.

Электрод: диаметр расходуемого электрода $D_e = 0,4$ м. Соотношение $A_{\text{ш}} = D_e/D_k$.

Шлаковая ванна: плотность шлака $\rho_{\text{ш}} = 2800$ кг/м³.

Конструкция: вертикальная колонна, состоящая из:

- Медного водоохлаждаемого кристаллизатора (аналог «футеровки», но активно охлаждаемой).
- Силового узла перемещения электрода (аналог «каркаса»).
- Опорной рамы и плиты (аналог «фундамента»).

Температура: шлака 1700 – 1750 °С, кристаллизатора < 200°С.

Нагрузки: большие сосредоточенные весовые и динамические от механизма подачи.

Задание:

1. Проверить, соответствует ли соотношение диаметров электрода и кристаллизатора ($A_{\text{ш}}$) рекомендуемому диапазону для данного размера печи. Рассчитать глубину шлаковой ванны $h_{\text{ш}}$.
2. Объяснить, почему в данном тепловом агрегате классическая футеровка заменена на водоохлаждаемый кристаллизатор. К каким материалам (из таблицы 3) по свойствам должна быть близка медь кристаллизатора?
3. Опишите, какие функции металлического каркаса/рамы являются первостепенными для агрегата ЭШП.
4. Каковы основные отличия в требованиях к фундаменту (опорной плите) агрегата ЭШП по сравнению с фундаментом классической печи? (Учесть низкую температуру основания, но высокие динамические и сосредоточенные нагрузки).
5. Предложите, в каком элементе конструкции агрегата ЭШП **наиболее критично** возникновение температурных напряжений (по аналогии с системой кожух–футеровка) и почему?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Громова, Е. Н. Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки. Ч. 1 : учебное пособие / Е. Н. Громова. – СПб: ВШТЭ СПбГУПТД, 2020. – 88 с. – Текст: непосредственный.
2. Громова, Е. Н. Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки. Ч. 2 : учеб. пособие / Е. Н. Громова. – СПб: ВШТЭ СПбГУПТД, 2021. – 63 с. – Текст: непосредственный.
3. Бельский, А. П. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях : учебное пособие / А. П. Бельский, В. Ю. Лакомкин, С. Н. Смородин. – 3-е изд., испр. – 136 с. – СПб: СПбГТУРП, 2012. – Текст: непосредственный.
4. Жучков, П. А. Расчет и проектирование высокотемпературных установок целлюлозно-бумажных предприятий : учебное пособие / П. А. Жучков. – 103 с. – Л.: ЛТА, 1979. – Текст: непосредственный.
5. Щукин, А. А. Промышленные печи и газовое хозяйство заводов : учебник для вузов / А. А. Щукин. – 2-е изд., перераб. – 224 с. – М.: Энергия, 1973. – Текст: непосредственный.

Учебное издание

Громова Екатерина Николаевна

**Моделирование
высокотемпературных процессов
и установок**

Практикум

Редактор и корректор Д. А. Романова
Техн. редактор М. Д. Баранова

Учебное электронное издание сетевого распространения

Системные требования:
электронное устройство с программным обеспечением
для воспроизведения файлов формата PDF

Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016, по паролю.
- Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 16.03.2026 г. Рег.№ 5241/25

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.